

色度学

汤顺青
主编

北京理工大学出版社

色 度 学

汤顺青 主编

北京理工大学出版社

DUL51/16

内 容 简 介

本书系统介绍颜色基本理论和测量原理,着重叙述国际照明委员会(CIE)正式推荐的色度学规定和测色方法;对其他表色系统,如美国光学学会的OSA表色系统和瑞典的自然色系统(NCS)也做了简要介绍;对颜色测量中的同色异谱、光源显色性、白度测量等问题都有详细阐述,还简单介绍了测色仪器的类型及工作原理;最后讲述了色度学的应用。书末附有大量表格可供查阅。

本书可作为高等工科院校有关专业的本科生或研究生教材,亦可供从事纺织、印刷、摄影、电视、轻工、商业等科技工作者阅读。

色 度 学

汤蔚青 主编

*

北京理工大学出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京理工大学出版社印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 9.125印张 插页1 235千字

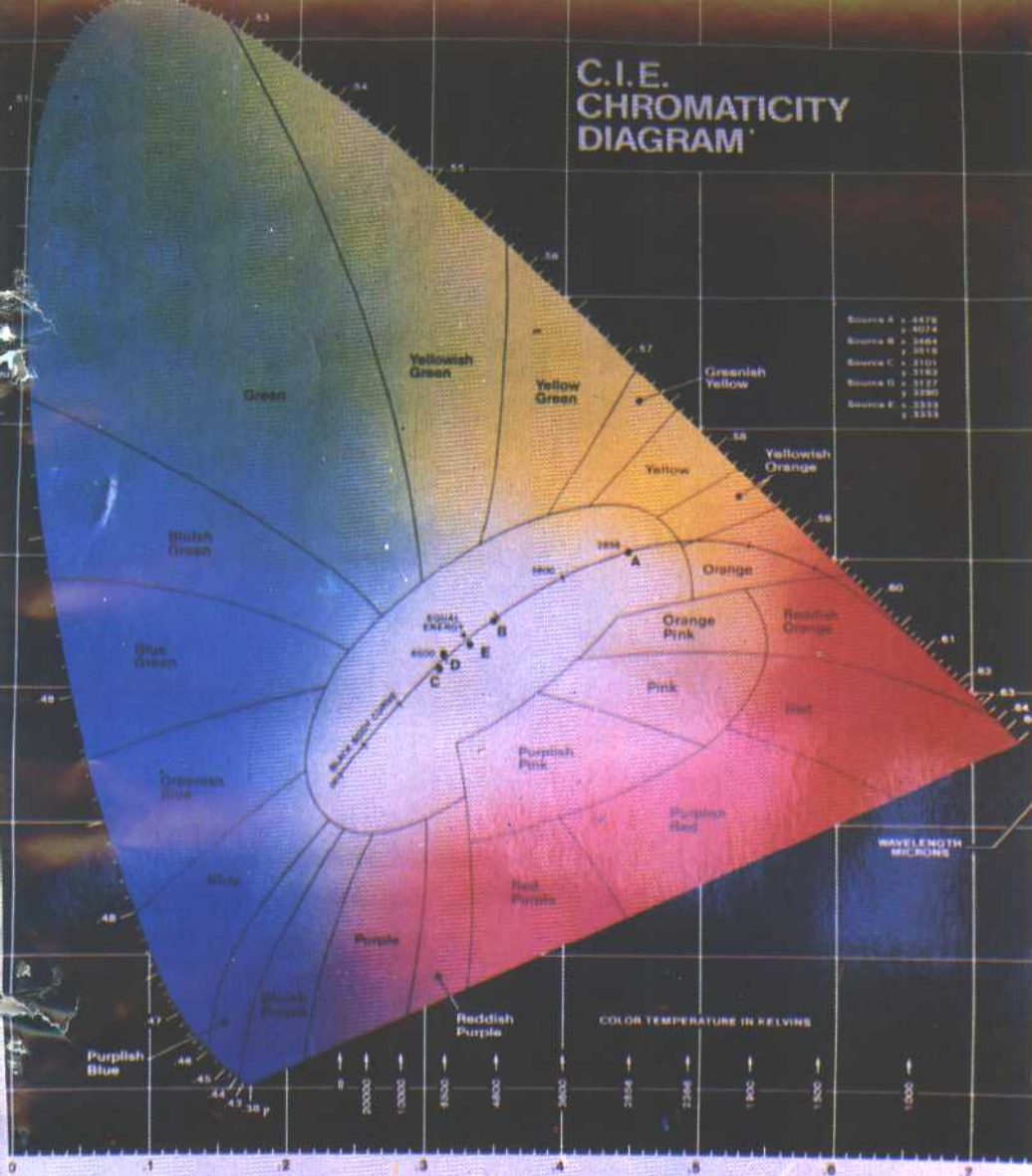
1990年6月第一版 1990年6月第一次印刷

ISBN 7-81013-317-9/O·56

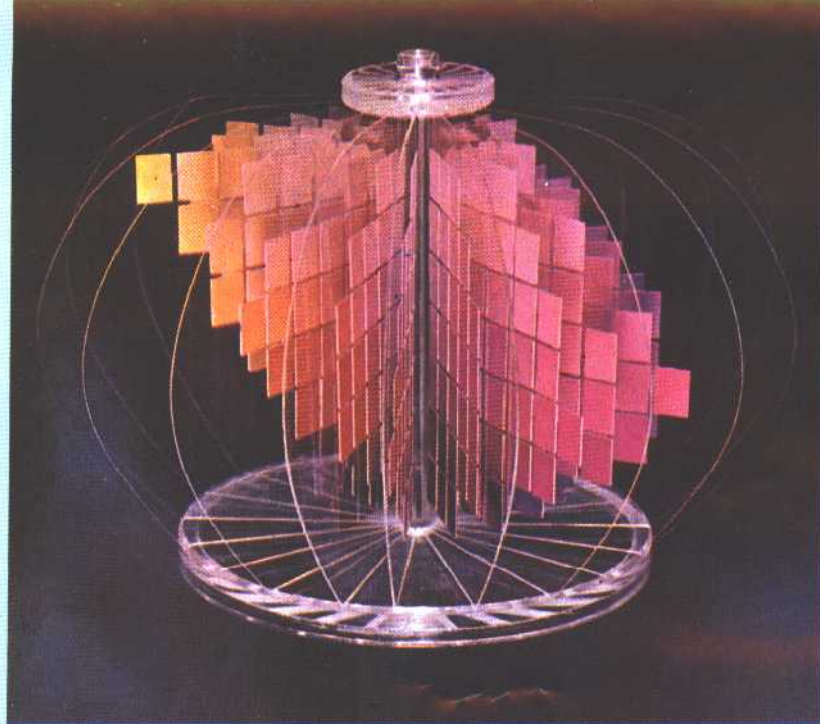
印数: 1—2400册

定价: 2.60元

C.I.E. CHROMATICITY DIAGRAM



孟塞尔色立体



奥斯瓦尔德色立体

前 言

近年来随着国民经济的发展,对颜色问题各有关部门逐渐重视起来,许多院校开设了色度学课程。本教材是在北京理工大学工程光学系自1980年以来开设的“色度学”课程基础上编写的。本书是一本系统介绍颜色基本理论和测量原理的书。着重叙述国际照明委员会(CIE)正式推荐的色度学规定和测色方法;对其它表色系统尤其对美国光学学会的OSA表色系统和瑞典的自然色系统(NCS)也作了简要介绍;对颜色测量中的同色异谱、光源显色性、白度测量等问题都有详细的阐述;简单介绍了测色仪器的类型和工作原理;在书的最后一章讲述了色度学在彩色摄影和彩色电视中的应用,尤其对摄影镜头色增生指数(CCI值)和摄影闪光光源的光谱分布指数(SDI值)的计算和计算方法也做了详细叙述。书后附有大量的数据表格,可供读者实际工作时使用。

本书可作为高等工科院校有关专业本科生、研究生的教材,也可供纺织、印刷、摄影、电视、轻工、商业等部门有关工作者阅读参考。

全书由汤顺青同志主编,其中第一、四章由朱正芳同志编写,全书由苏大图同志校阅。在本书的编写过程中王基鸿、李全臣两同志给予了很多帮助,陈秀云同志对书稿的整理作了大量工作,在此一并表示感谢。

编 者

1988.12

目 录

绪言

第一章 光与色觉 (1)

- § 1.1 光源 (1)
- § 1.2 物体的光谱特性 (7)
- § 1.3 视觉的生理基础 (15)
- § 1.4 颜色视觉 (25)

第二章 CIE标准色度系统 (34)

- § 2.1 颜色匹配 (34)
- § 2.2 CIE 1931 标准色度系统 (42)
- § 2.3 CIE 1964 补充标准色度系统 (55)
- § 2.4 CIE 标准照明体和标准光源 (59)
- § 2.5 CIE 色度计算方法 (69)
- § 2.6 主波长和色纯度 (79)
- § 2.7 均匀颜色空间 (82)
- § 2.8 同色异谱程度的评价 (102)
- § 2.9 CIE 光源显色指数计算方法 (113)

第三章 其它表色系统 (124)

- § 3.1 孟塞尔系统 (124)
- § 3.2 奥斯瓦尔德系统 (145)
- § 3.3 自然色系 (NCS) (147)
- § 3.4 OSA 匀色标 (149)

第四章 颜色测量及颜色测量仪器 (152)

- § 4.1 分光测色仪器 (153)

§ 4.2 色度计	(165)
§ 4.3 光源颜色特性的测量	(171)
§ 4.4 荧光材料的颜色测量	(174)
§ 4.5 白度的测量	(178)
第五章 色度学的应用	(184)
§ 5.1 彩色电视	(184)
§ 5.2 彩色摄影	(203)
附 表	(225)

绪 言

色度学是研究颜色度量和评价方法的一门学科，是颜色科学领域里的一个重要部分。

颜色感觉与听觉、嗅觉、味觉等都是外界刺激使人感觉器官产生的感觉。光经过物体反射或透射后刺激人眼，人眼产生了此物体的光亮度和颜色的感觉信息，并将此信息传至大脑中枢，在大脑中将感觉信息进行处理，于是形成了色知觉。人们就可辨认出此物体的明亮程度、颜色类别、颜色纯洁的程度（明度、色调、饱和度）。外界光刺激→色感觉→色知觉是个复杂的过程，它涉及光学、光化学、视觉生理、视觉心理等各方面问题，要想度量色知觉量是很复杂的。心理物理学就是研究知觉量与外界刺激量之间关系而发展起来的一门学科。色度学要解决颜色的度量问题首先必须找到外界光刺激与色知觉量之间的对应关系，以便能用对光物理量的测量间接地测得色知觉量，因此应用了心理物理学的方法，通过大量的科学实验，建立了现代色度学。它是一门以光学、视觉生理、视觉心理、心理物理等学科为基础的综合性科学，也是一门以大量实验为基础的实验性科学。现代色度学初步解决了对颜色作定量描述和测量的问题。

描述颜色最简单的方法是用颜色名词。给每种颜色一个固定的名称，并冠以适合的形容词，将这些名词汇编成颜色名词词典，为人们互相交流色知觉信息提供了一种简单、古老的方式，但它不能定量地表示色知觉量。人们还用制作标准色卡的方式来描述颜色，色卡可以有不同分类及排队方式，因而形成了不同的表色系统。例如第三章中介绍的孟塞尔表色系统，它是按照色知觉的明度、色调及饱和度这三个特征量的大小排队，并按各特征量的差值相同的原则来制作色卡，给每个色卡一定的标号，以

此种色卡作为目视测量颜色的标准。用这种系统来测量颜色，在一定条件下反映了人的色知觉量。用心理物理学方法经过大量实验，研究了人眼的视觉规律而建立起来的国际照明协会的CIE色度系统，可以用数字量来表示颜色，并可用物理仪器代表人眼来测量颜色。这部分内容是色度学中最基本的内容。用CIE色度系统度量的颜色是心理物理量，尚不能完全反映人们的色知觉。

色度学这门科学最早开创于牛顿，他引入了颜色环的概念，从而开创了建立颜色图的思想，他还提出了颜色混合中用重心原理来确定混合色结果的方法。19世纪，科学家格拉斯曼(Grassmann)、麦克斯韦(Maxwell)、赫姆霍尔兹(Helmholtz)等对色度学的进一步发展作出了巨大的贡献。奠定现代色度学基础的科学家有吉尔德(Guild)、贾德(Judd)、麦克亚当(Macadam)、司梯鲁斯(Stiles)、莱特(Wright)和维泽斯基(Wyszecki)。从1931年CIE色度学系统建立至今的50多年，色度学已取得了巨大的成绩。在工农业生产、科学技术和文化事业等部门色度学得到广泛利用，它的理论指导着彩色电视、彩色摄影和彩色印刷、染料、纺织、造纸、交通信号、照明技术等部门的工作，各色各样的测色仪器都在产品检验和生产质量控制中获得了广泛应用。

但是现代色度学测量颜色的结果，是在一定简化的条件下进行的，有它的局限性，还不能完全代表人们的色知觉。色度学的最终目标是要解决在复杂环境中物体颜色外貌的度量问题，目前距离此目标尚很遥远，有待色度工作者不懈的努力。

第一章 光与色觉

§1.1 光源

一、可见光辐射

在整个电磁波谱中，能引起人眼视觉的只是一小部分。刺激人眼能引起视觉的光辐射称为可见光辐射，简称可见光。要严格确定可见光的波长范围是很困难的，一般来说，可以取波长380~780 nm 作为可见光的范围。然而当光很强，人眼又在暗适应情况下，眼睛可感受的波长范围至少可扩大到350~900 nm。

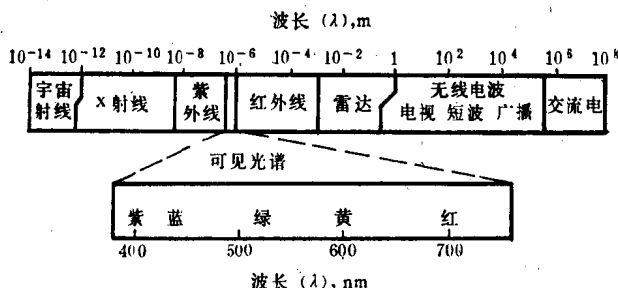


图 1-1

可见光的波长不同，引起人眼的颜色感觉就不同。单色光的波长由长到短，对应着的颜色感觉由红到紫。一般认为：

红色 770~620 nm, 橙色 620~590 nm,

黄色 590~560 nm, 黄绿色 560~530 nm,

绿色 530~500 nm, 青色 500~470 nm,

蓝色 470~430 nm, 紫色 430~380 nm。

这种划分只是给出大致的范围。实际上单色光的颜色是连续渐变

的，不存在严格的界限。并且单色光的颜色感觉随着光的强度变化而变化，实验指出光谱上除了三个点（572 nm，503 nm，478 nm）不受光强变化的影响外，其他各波长的颜色都会略有改变。例如 660 nm 的红色光当视网膜照度由 2000 楚兰德（Troland）减到 1000 楚兰德时，就必须减少波长 34 nm 才能保持原来的颜色。（1 楚兰德 = 刺激亮度 $1 \text{ cd/m}^2 \times \text{瞳孔面积 } S \text{ mm}^2$ ）。

自然界人们见到单色光的机会不多，一般都是复色光。一定成分的复色光，有一种确定的颜色与之对应；但是反过来，一种颜色感觉并不只对应一种光谱组合，就是说两种成分完全不同的复色光有可能引起的颜色感觉完全一样，这就是以后要讲的同色异谱问题。

二、光谱分布

自然光源和人造光源大都是由单色光组成的复色光。光源的辐射能按波长分布的规律随着光源的不同而变化。以波长“ λ ”为中心的微小波长宽度范围内辐射量为 dX 时，则单位波长宽度所对应的辐射量称为光谱密度 X_λ

$$X_\lambda = \frac{dX}{d\lambda} \quad (1-1)$$

式中辐射量可以是辐通量、辐射强度、辐亮度、辐照度等量中的一种。波长不同，光谱密度一般不同。将光源的光谱密度与波长之间的关系用函数表示时，则此函数称为光谱分布 $X_\lambda(\lambda)$ 。

色度学主要关心的是光谱分布的相对值而不是绝对值，令光谱分布函数的最大值为“1”，将函数的其他值进行归化，经过归化后的光谱分布称为相对光谱功率分布。

图 1-2 中所示的是几种典型的光谱分布。常见的光源属于图 1-2 中所示的分布之一。图中 (a) 称为线状光谱，它由若干条明显分隔的细线组成，如低压钠灯的光谱分布就是由波长为 589.0 nm 和 589.6 nm 的两条黄色谱线构成。图中 (b) 称为带状光谱，它

由一些分开的谱带构成，每个谱带又包含许多紧靠的细线，如碳弧和高压汞灯就属于这种分布。(c)为连续光谱，所有热辐射光源的光谱都是连续光谱，是光源中最常见的一种分布，例如太阳和白炽灯。(d)是混合光谱，是前三种的组合，它由连续光谱与线、带谱混合而成，日常生活中常用的荧光灯的光谱就属于这种分布。

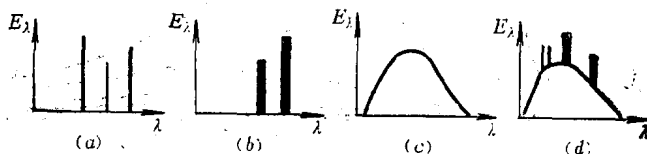


图 1-2

光源的光谱分布既是它本身光色的决定因素，又是在它照明下观察物体时，影响颜色的重要因素之一，这在第二章里将要讲到。

三、完全辐射体的光谱分布

完全辐射体又称为黑体或普朗克辐射体。它是指在任何温度下将落到它表面上的任何波长的辐射全部吸收，也就是它的光谱吸收比恒等于1的物体。黑体的辐射特性由普朗克公式来描述

$$M_{e,\lambda}(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} (e^{C_2/\lambda T} - 1)^{-1} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \quad (1-2)$$

式中 $M_{e,\lambda}$ 为光谱辐射出度，即单位波长间隔内单位面积发射出的辐射通量； T 为绝对温度，单位是 K； $C_1 = 3.74150 \times 10^{-16} \text{W} \cdot \text{m}^2$ ；

$C_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{m} \cdot \text{K}$ ； λ 是波长，单位是 m。

图 1-3 是黑体辐射的相对光谱功率分布曲线。由图知，随着温度的升高，黑体的辐射功率迅速增加，且峰值波长向短波方向移动。黑体辐射的光谱分布完全决定于它的温度。只要温度一定，它的光谱分布就可以计算出来。正因为这样，黑体在辐射度学、光度学、色度学中有十分重要的意义。在辐射测量中，用黑体作

为初级标准，来标定其他标准辐射体。这些辐射体就可作为常用的测量标准。

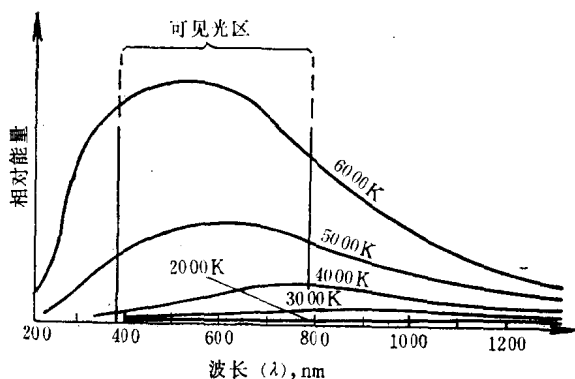


图 1-3

绝对黑体在自然界中是没有的，但是可以制造出性质极为近似的物体。图 1-4 所示的是一个作为光度初级标准的黑体装置，称为基准器。它的主要部分是内层氧化钽坩埚，里面装有高纯度铂。在铂的中间插一根高 45 mm、内径 2.5 mm 的观察管，管内装有三分之一的高纯度氧化钽粉，坩埚上有一个盖，盖的中部有一直径为 1.5 mm 的小孔。盖与观察管构成的小空腔便成为一个黑体。当铂在凝固或熔化过程中保持恒定温度 1769°C，在这个

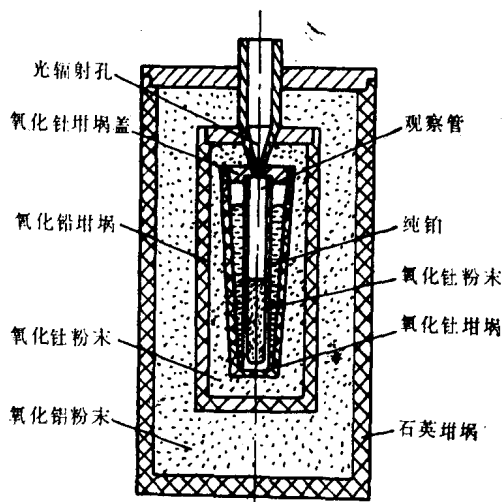


图 1-4

过程中的辐射就是黑体辐射，它的光谱分布可由普朗克公式计算得到。

§ 1.2 物体的光谱特性

在太阳光照射下，不同物体呈现出不同颜色。原因就在于物体对光谱成分有选择吸收和选择反射的性质。物体本身的光谱特性是物体产生不同颜色的主要原因。光照射到物体上后，部分被反射，部分被吸收，部分透过。透明体的颜色主要由透过的光谱组成决定；不透明体的颜色则由它的反射光谱组成决定。

一、光的吸收及透射

光射到物体上，可能发生反射、吸收及透射。图 1-5 为均匀透明物体， $I_0(\lambda)$ 为射到第一面的单色光辐通量， $I_1(\lambda)$ 为从第一面进入物体的辐通量， $I_2(\lambda)$ 为到达第二面的辐通量， $I_3(\lambda)$ 为从第二面射出的辐通量，则：

光谱透射比为

$$\tau(\lambda) = \frac{I_3(\lambda)}{I_0(\lambda)}$$

(1-3)

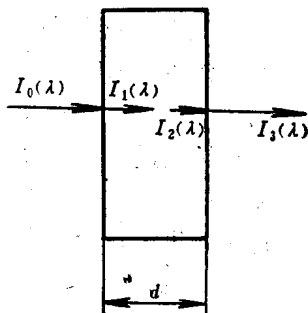


图 1-5

内光谱透射比为 $\tau_i(\lambda) = \frac{I_2(\lambda)}{I_1(\lambda)}$ (1-4)

吸收度为 $A(\lambda) = -\log_{10} \tau_i(\lambda)$ (1-5)

吸收系数为 $a(\lambda) = \frac{A(\lambda)}{d}$ (1-6)

吸收度也称为密度，密度常用 D 表示。

上式中 d 为物体厚度。

各向同性的均匀透明物体遵守朗伯定律

$$\tau_i(\lambda) = \tau_{0i}(\lambda) d/d_0 \quad (1-7)$$

式中 d 和 d_0 分别为新厚度和原始厚度； $\tau_i(\lambda)$ 和 $\tau_{0i}(\lambda)$ 为它们对应的内光谱透射比。由朗伯定律，只要知道物体某一厚度时的光谱内透射比就可求得任意厚度时的光谱内透射比。

光谱透射比可由光谱内透射比和物体表面的反射损失求出来，近似表示为

$$\tau(\lambda) = (1 - \rho_\lambda)^2 \tau_i(\lambda) \quad (1-8)$$

ρ_λ 为物体表面的光谱反射比，可用费涅耳定律求得

$$\rho_\lambda = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \quad (1-9)$$

n_1, n_2 为两种介质的折射率。

如果光射到不均匀物体上，光束在物体内部被打乱，从各个方向透过物体，如图 1-6 所示。一部分光线按照原入射方向行进，这部分称为正透射光；另一部分光从各个方向透过物体，称为漫透射光。图中 (1) 表示测试积分球的开口与物体相接，它全部收集了透过物体的光能，这样测定的透射比称为全透射比。图中 (2) 表示测试积分球离开物体进行测试，只有正透射光能进入积分球而被收集，这样测定的透射比称为正透射比。从全透射比减去正透射比则得到漫透射比。

透明物体的颜色特性可以从它的光谱透射比计算出来，所以，在色度学中光谱透射比的测定有重要意义。光谱透射比是用分光光度计来测量的。

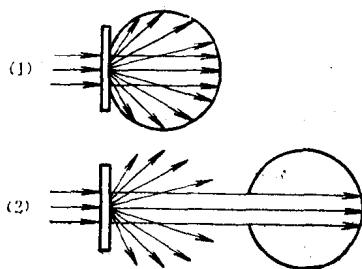


图 1-6

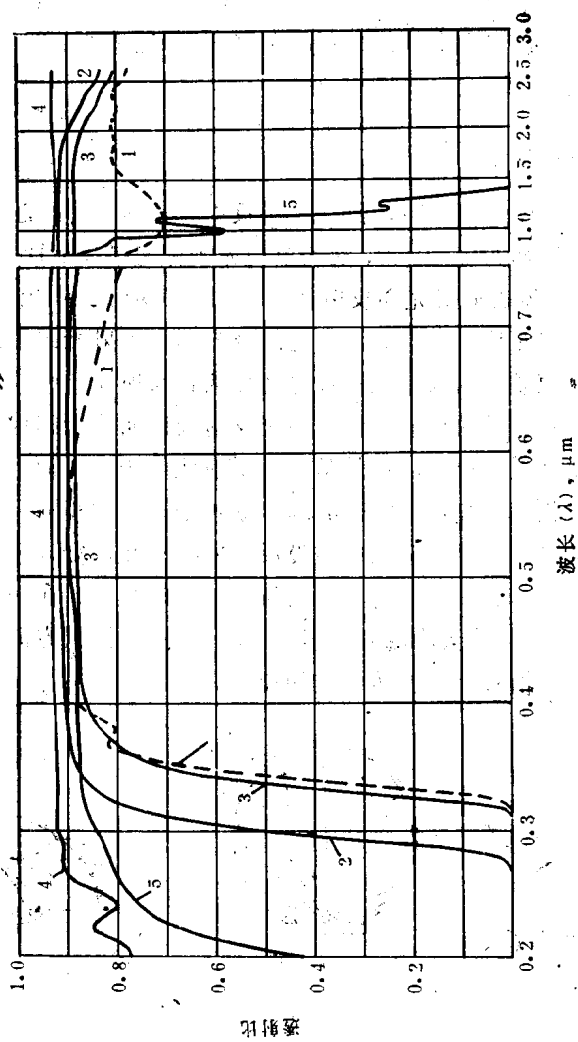


图 1-7